第45卷 第6期
2022年11月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

甘肃北部短时强降水中尺度特征及物理量配置

钱 莉[1,2,3]， 张春燕[3]， 杨 梅[3]， 李天江[3]

（1. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃省（中国气象局）干旱气候变化与减灾重点（开放）实验室，甘肃 兰州 730020；2. 中国气象局云雾物理环境重点实验室，北京 100081；3. 甘肃省武威市气象局，甘肃 武威 733000）

摘 要：利用甘肃北部27个国家级自动气象站及635个区域气象站降水资料，结合常规高空、地面和欧洲中期天气预报中心（ECMWF）再分析物理量场资料，选取了2016—2019年5—9月104个典型短时强降水个例，对甘肃北部短时强降水天气发生发展的环境条件进行了中尺度综合分析，揭示了区域内短时强降水的一些特征和规律。结果表明：（1）甘肃北部短时强降水集中出现在6—8月，短时强降水的强度多为10~20 mm。（2）甘肃北部短时强降水天气的典型特征，分为副高边缘型、低压槽型、西北气流型和河套阻高型4种流型。（3）通过分析不同天气形势、不同类别、不同物理量参数间的联系与区别，总结出各类短时强降水天气的环流特征和物理量要素指标和阈值。（4）地面辐合线（冷锋）是甘肃北部触发强对流天气的关键系统，地面辐合线（冷锋）的分析对短时临近预报至关重要。（5）低空偏南风急流（显著流线）在110°E左右北上及在37°N左右产生辐合是判断甘肃北部能否产生短时强降水的重要依据。并对2020年短时强降水预报效果进行检验，预报准确率达63.6%，说明建立的短时强降水预报指标预报能力较强，为提高短时强降水预报预警能力提供了一种新途径。

关 键 词：短时强降水；天气类型；中尺度分析；物理量；要素配置
文章编号：1000－6060（2022）06－1707－11（1707～1717）

中尺度分析是对造成强对流天气的高影响天气系统，根据各要素的配置关系，判断强对流天气落区的一种基于构成要素的新型预报分析方法[1]。由于强对流天气不满足地转平衡等约束关系，因此中尺度分析使用大量非常规天气分析资料，通过分析水汽输送、不稳定条件和抬升条件的配置，以便有效提高强对流天气的预报准确率[2-3]。Doswell等[4]得出了“配料法”的基本概念，这种方法给预报员分析强对流天气提供了清晰的预报思路。目前国内已有不少学者开展不同大尺度环流背景下强对流天气预报的思路和方法研究，郑媛媛等[5]进行了不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究，徐爱华等[6]研究了中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征，白晓平等[7]研究了西北地区东部短时强降水概念模型；近年来许多学者尝试利用物理量阈值进行强对流天气预报指标研究，如张一萍等[8]利用物理量分析河南对流天气特征，周后福等[9]利用稳定度和能量指标作为强对流天气短时预报指标等；已有不少研究提出了利用“配料法”预报强对流天气的思路和方法，如刘国忠等[10]基于“配料法”开展持续性暴雨预报技术研究，何钰等[11]基于“配料法”建立云南短时强降水预报概念模型；还有学者利用特种观测手段分析了短时强降水特征，如孔祥伟等[12]分析了甘肃河东地区不同环流形势下短时强降水的雷达回波特征，王俊等[13]分析了短时强降水和冰雹云降水个例的雨滴谱特征。大量的研究标志着我国强对流天气预报能力有了较大提高[14-16]。

甘肃省北部深居欧亚大陆腹地，降水稀少，年降水量为39.9~400.7 mm，是典型的干旱与极干旱地

收稿日期：2022-02-24； **修订日期**：2022-04-26
基金项目：干旱气象科学研究基金（IAM201713）；西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目资助
作者简介：钱莉（1963-），女，正研级高级工程师，主要从事天气预报和研究工作. E-mail: wwqxjql@163.com

区,但由于地处青藏高原边坡,易形成强对流短时强降水天气,短时强降水形成的地表径流迅速向山谷汇集下泄,极易形成局地山洪、滑坡、泥石流等地质灾害,破坏性很大。由于特殊的地形地貌,导致强降水的局地性强,加上观测站点稀疏,短时强降水预报难度大。钱莉等[17-18]研究了造成河西走廊东部暴雨和冰雹的大尺度天气类型。目前对甘肃北部短时强降水中尺度要素配置特征的研究还较少,本文参考黄玉霞等[19]对甘肃省强对流天气的分型讨论及各类天气的概念模型,选取甘肃北部强对流性天气中的短时强降水类,在天气尺度分型的基础上,构建短时强降水中尺度要素配置阈值,并通过对比分析,总结出具有较好指示意义的预报指标,以期提高该区域短时强降水的预报预警准确率。

1 研究区概况

研究区位于甘肃北部,包括酒泉、嘉峪关、张掖、金昌、武威、白银、兰州7市所辖区域(图1)。研究区内共有27个国家级自动气象站、635个区域气象站。根据甘肃《短时强降水等级》(DB62/T 2755-2017)》中甘肃北部短时强降水过程定义,甘肃北部短时强降水标准为1 h降水量(统称小时雨强)≥10 mm。本文约定甘肃北部短时强降水过程的定义为国家站≥1站或区域站≥3站的小时雨强≥10 mm·h^{-1}或日雨量≥30 mm即为一次短时强降水天气过程。

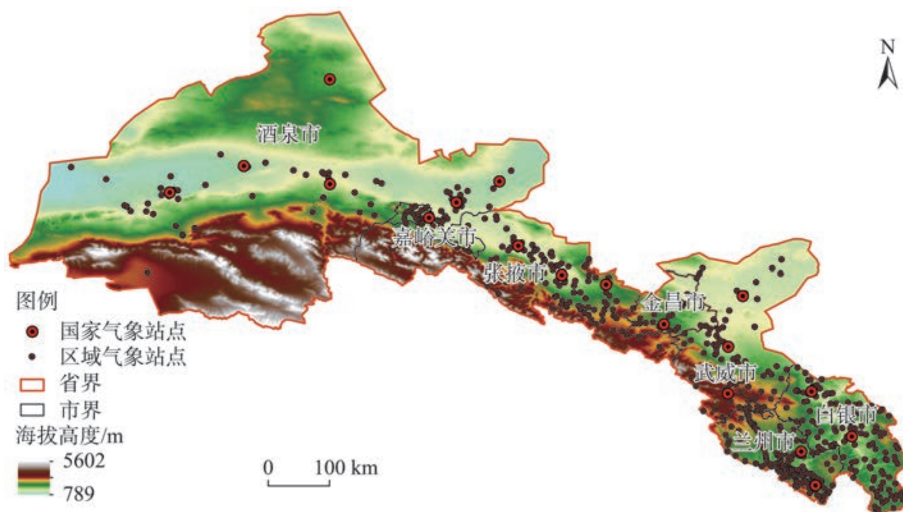
2 数据与方法

2.1 数据来源

选取区域内2016—2019年5—9月27个国家级自动气象站以及635个区域气象站达到设定短时强降水标准的降水资料,降水时段为08:00—次日08:00(北京时间),降水数据通过极值、时间连续性检查,剔除有误观测数据,达到约定短时强降水标准的个例共计104个。使用2016—2019年5—9月逐日08:00高空500 hPa、地面历史资料以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析资料(分辨率0.125°×0.125°),通过MICAPS 4.2系统天气分析工具和中尺度分析工具箱,参考甘肃省强对流天气中尺度分析业务技术规范[19],对每个短时强降水个例进行天气形势和中尺度分析。

2.2 研究方法

本文采用强对流天气流型辨识和基于构成要素的预报方法(配料法),分析甘肃北部短时强降水的形态和物理量特征,对水汽输送、抬升条件及深厚对流发生的不稳定条件进行分析。其中,700 hPa以下气层温度露点差(t_{700}-td_{700})、比湿(q_{700})、水汽通量散度(qfdiv$_{700}$)、假相当位温(θ_{se700})以及湿层厚度、低空偏南风急流表征水汽条件;短时强降水所处位置在500 hPa槽前、配合有中低层低涡切变、地面辐合线以及200 hPa急流低空辐合线表征抬升条件;



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 甘肃北部地形及观测站点分布

Fig. 1 Topography and distribution of observation stations in northern Gansu Province

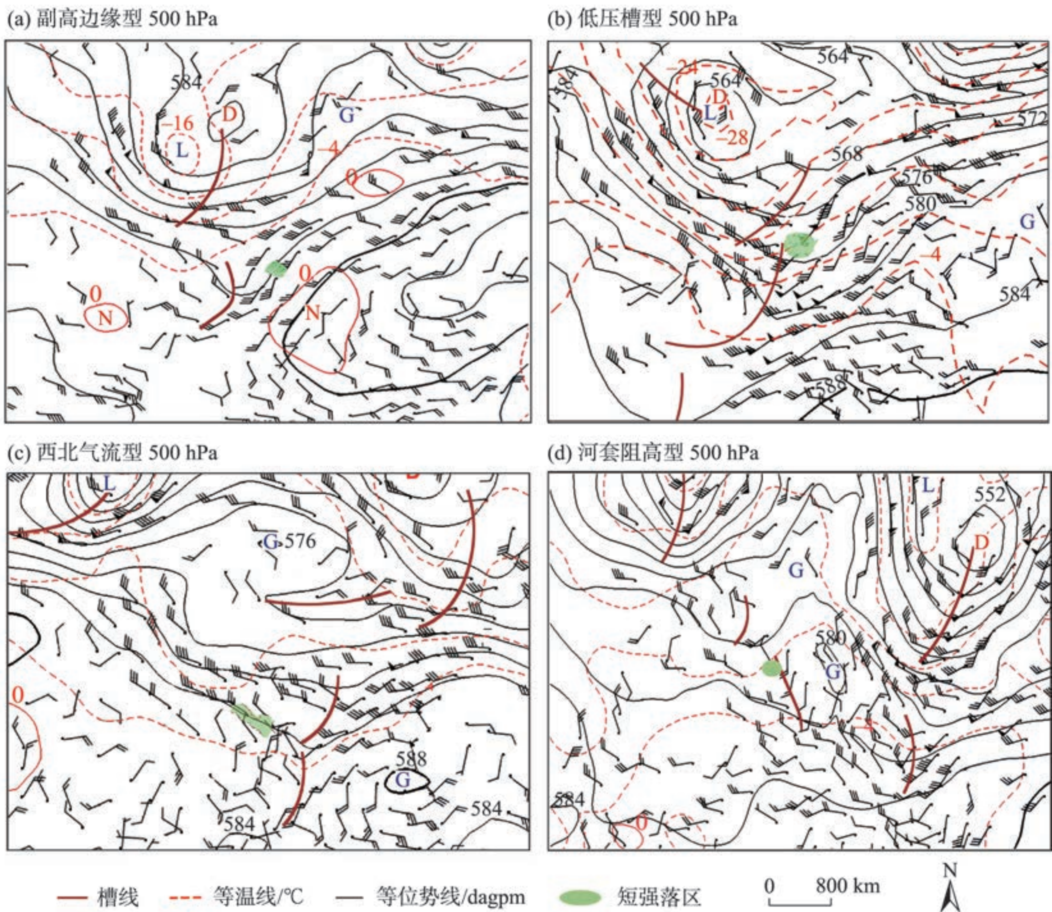
短时强降水区温度垂直分布、湿度垂直分布、700 hPa与500 hPa间温差（$t_{700}-t_{500}$）、对流有效位能（CAPE）、气团指数（K）、700 hPa涡度（VOR_{700}）表征不稳定条件。通过中尺度分析图给出各种关键参数的配置线条图以及阈值，使用2020年5—9月逐日08:00高空500 hPa、地面和ECMWF数值预报再分析产品对区域内短时强降水预报指标阈值进行检验。

3　结果与分析

3.1　短时强降水过程天气尺度主要流型

依据500 hPa环流形势，对2016—2019年甘肃北部104个短时强降水个例主要影响环流形势进行天气学分型，分为副高边缘型、低压槽型、西北气流型和河套阻高型。

3.1.1　副高边缘型　此类短时强降水是甘肃北部主汛期发生频率最多的一类，占总次数的34%。具有出现范围大、持续时间长、累积雨量大的特点。主要出现在6—8月，出现频次从东南向西北锐减。副高边缘型分两种类型，一种是500 hPa上副热带高压5880 gpm或5840 gpm线西伸明显，西太平洋副热带高压西伸达110°E以西，其西北边缘的暖湿气流维持在天水—兰州一线，同时河西走廊中西部为西风带低压槽控制，张掖市以东处在冷槽槽前与副热带高压边缘西南暖湿气流交汇处，短时强降水落区位于副高5880 gpm或5840 gpm线西侧西南风与西风带低槽槽前偏南风的交汇区域（图2a）。另一种是伊朗高压发展东移，副热带高压西伸，在青藏高原东北边坡形成两高之间的明显风向辐合，加之西风带有低槽东移，张掖市以东处在冷槽槽前与两高之间强烈的辐合气流交汇处，短时强降水落区位于两高之间辐合区及西风带低槽槽前偏南气流影响的区域（图略）。由于短时强降水均产生在副热带高压边缘，故将这两种类型合并为一种。



注：D为低压中心；G为高压中心；N为暖中心；L为冷中心。

图2　甘肃北部短时强降水500 hPa主要环流形势

Fig. 2　Main circulation situation in 500 hPa of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

3.1.2 低压槽型 此类短时强降水是甘肃北部主汛期发生频率次多的一类，占总次数的23%，多出现在5—7月，过程累积降水量小于副高边缘型，出现次数从东向西减少。500 hPa上河套东部为高压脊，新疆有低槽东移南压，青藏高原上有南支槽发展，西风槽与南支槽在青藏高原东北边坡同位相叠加，迫使低空孟加拉湾水汽向北输送，冷暖空气在甘肃北部上空交汇（图2b），短时强降水落区位于低槽前部。

3.1.3 西北气流型 此类短时强降水占甘肃北部主汛期发生频率第三位，占总次数的22%。多出现在午后到傍晚，呈分散性，并与地形有关，出现次数从东向西减少。500 hPa上河套东部为低压槽，新疆东部到甘肃北部为西北气流控制，有明显的冷温度槽配合（图2c）。由于高空存在较强冷平流，午后近地面增温促使短时强降水发生。

3.1.4 河套阻高型 此类短时强降水是甘肃北部主汛期发生频率最少的一类，占总次数的21%。是河西走廊产生极端降水的最主要天气类型，如1987年6月11日武威市凉州区日降水量65.4 mm、1985年6月3日金昌市永昌县日降水量62.7 mm、2019年6月20日酒泉市肃州区日降水量79.6 mm，均为该地有气象记录以来最强降水，这种类型多出现在6—7月。500 hPa上河套地区维持一高压，脊顶部向西北方向伸展，青藏高原上有南支槽发展，河套高压底部的偏东风与西风带中的偏西风在甘肃北部形成低涡切变线，河套阻塞高压既阻挡了高压脊底部低涡的东移，使低涡长时间在甘肃北部盘踞，又阻挡了偏南暖湿气流向更高纬度输送，使甘肃北部形成强水汽辐合区（图2d）。

3.2 短时强降水中尺度物理量要素配置

3.2.1 副高边缘型 此类短时强降水产生在500 hPa西风带低压槽前与5880 gpm或5840 gpm线西侧的西南气流（或青藏高压与副热带高压间的切变线）中，配合有低空切变线或低涡人字形切变，地面辐合线触发短时强降水爆发。短时强降水落区在高空偏西风急流入口区右侧或分流区中，低空南风急流（显著流线）的左前方（图3a）。500~850 hPa中低层存在深厚的湿层，短时强降水区处在t_{700}−td_{700}≤4 ℃、q_{700}≥8 g·kg^{-1}、θ_{se700}≥60 ℃的湿舌包围中，$qfdiv_{700}$≤−10 g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}，存在明显水汽通量辐合；短时强降水区存在上冷下暖的不稳定层结，VOR_{700}≥2×10^{-5}·s^{-1}、K≥30 ℃、CAPE≥29 J·kg^{-1}、上游t_{700}−t_{500}≥20 ℃（表1）。这种类型由于能湿条件好，具备一定的不稳定条件就可产生短时强降水。

3.2.2 低压槽型 此类短时强降水产生在500 hPa西风带低槽槽前，700 hPa有切变线或低涡配合，地面冷锋触发短时强降水爆发。短时强降水落区在高空偏西风急流出口区左侧、低空南风急流（显著流线）左前方（图3b）。500~850 hPa中低层存在深厚的湿层，短时强降水区处在t_{700}−td_{700}≤4 ℃、q_{700}≥7 g·kg^{-1}、θ_{se700}≥60 ℃的湿舌包围中，$qfdiv_{700}$≤−2 g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}，存在明显水汽通量辐合，能湿条件较好，但差于副高边缘型；短时强降水区高低空有较强的垂直风切变和上冷下暖的不稳定层结，VOR_{700}≥5×10^{-5}·s^{-1}、K≥30 ℃、CAPE≥20 J·kg^{-1}，上游t_{700}−t_{500}≥20 ℃（表1）。这种类型能湿条件和抬升条件均有利于产生短时强降水。

3.2.3 西北气流型 此类短时强降水产生在500 hPa西北气流中的冷平流区，配合有700 hPa切变线、地面辐合线，午后热对流发展触发短时强降水爆发。短时强降水落区在高空偏北风急流入口区右侧，低空南风急流（显著流线）与北风急流（显著流线）的辐合区（图3c）。700~850 hPa低层存在湿层，短时强降水区处在t_{700}−td_{700}≤7 ℃、q_{700}≥5 g·kg^{-1}和θ_{se700}≥52 ℃的湿舌包围中，$qfdiv_{700}$≤−1 g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}，存在水汽通量辐合，能湿条件为4种类型中最弱；由于500 hPa高空强冷平流，700 hPa河套暖脊特征明显，存在上冷下暖、上干下湿的不稳定层结，高低空存在强烈的垂直风切变，VOR_{700}≥2×10^{-5}·s^{-1}、K≥28 ℃、CAPE≥40 J·kg^{-1}、上游有t_{700}−t_{500}≥20 ℃中心（表1）。这种类型能湿条件虽为4种类型中最弱，但由于存在较强热力不稳定，仍可在午后热力条件发展和地形抬升的作用下产生短时强降水。

3.2.4 河套阻高型 此类短时强降水产生在500 hPa河套阻高底部的低涡中，700 hPa有低涡人字形切变，地面辐合线触发短时强降水爆发。短时强降水落区在低空南风急流（显著流线）、偏东风急流（显著流线）与偏西风急流（显著流线）的辐合区（图3d）。500~850 hPa中低层存在深厚的湿层，短时强降水区处在700 hPa以下t_{700}−td_{700}≤4 ℃、q_{700}≥8 g·kg^{-1}、θ_{se700}≥55 ℃的湿舌包围中，$qfdiv_{700}$≤−1 g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}，存在水汽通量辐合。由于短时强降水区高低空存在深厚的低涡，辐合上升运动强烈，VOR_{700}≥12×10^{-5}·s^{-1}

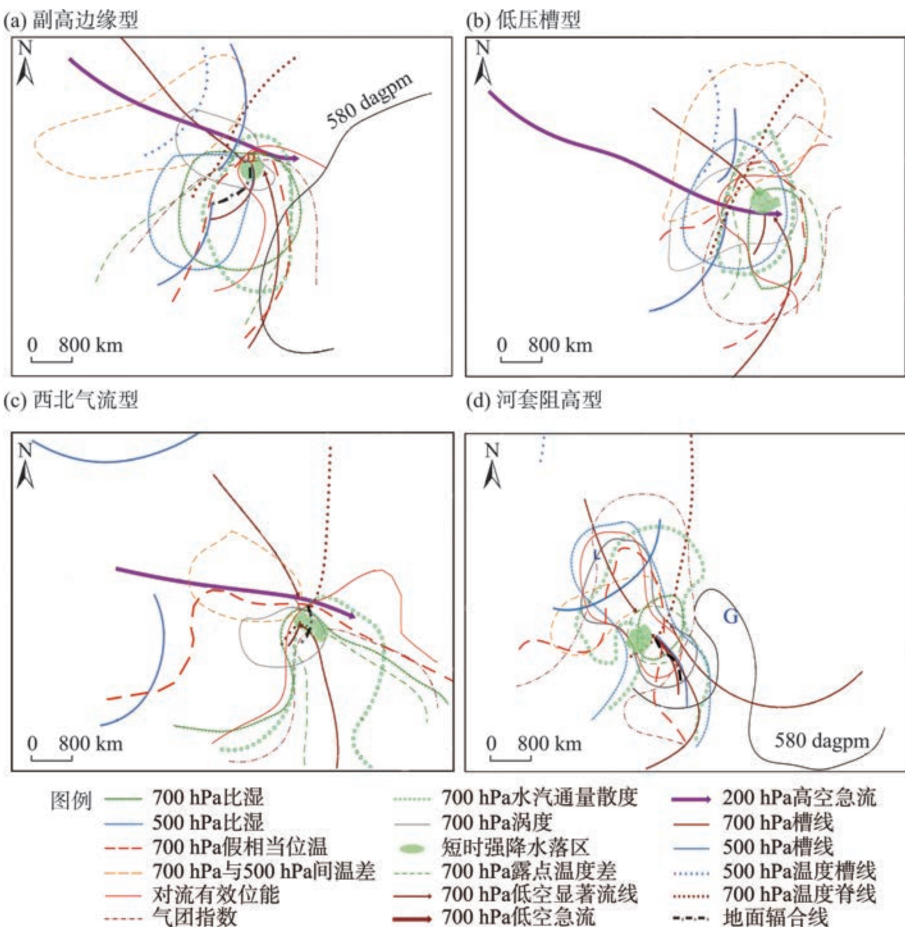


图3 甘肃北部短时强降水主要环流中尺度物理量要素配置

Fig. 3 Mesoscale physical element configuration of main circulation of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

表1 甘肃北部短时强降水主要环流中尺度物理量阈值

Tab. 1 Mesoscale physical quantity thresholds of main circulation of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

	物理量阈值	副高边缘型	低压槽型	西北气流型	河套阻高型
抬升条件	500 hPa槽前	是	是	否	是
	中低层低涡切变	有	有	有	有
	地面辐合线	有	有	有	有
	低空辐合	有	有	有	有
	200 hPa急流	西风急流或分流区	西北风急流	西北风急流或分流区	西风急流
水汽条件	t_{700}–td_{700}/℃	≤4	≤4	≤7	≤4
	q_{700}/g·kg^{-1}	≥8	≥7	≥5	≥8
	qfdiv$_{700}$/g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}	≤−10	≤−2	≤−1	≤−1
	湿层/hPa	500~850	500~850	500~700	500~850
	低空偏南风急流（显著流线）	有	有	有	有
	θ_{se700}/℃	≥60	≥60	≥52	≥55
不稳定条件	温度垂直分布	上冷下暖	上冷下暖	上冷下暖	上冷下暖
	湿度垂直分布	深厚湿层	深厚湿层	上干下湿	深厚湿层
	t_{700}–t_{500}/℃	≥20	≥20	≥20	≥20
	CAPE/J·kg^{-1}	≥29	≥20	≥40	≥50
	K/℃	≥30	≥30	≥28	≥32
	VOR$_{700}$/10^{-5}·s^{-1}	≥2	≥5	≥2	≥12

注：t_{700}–td_{700}为700 hPa温度露点差；q_{700}为700 hPa比湿；qfdiv$_{700}$为700 hPa水汽通量散度；θ_{se700}为700 hPa假相当位温；t_{700}–t_{500}为700 hPa与500 hPa间温差；CAPE为对流有效位能；K为气团指数；VOR$_{700}$为700 hPa涡度。下同。

为4种类型中最大，并在短时强降水区 $K\geq32$ ℃、CAPE≥50 J·kg^{-1}，上游有 $t_{700}-t_{500}\geq20$ ℃中心（表1）。这种类型由于有水汽的持续输入和强烈的上升运动，短时强降水持续时间长。

3.3 典型个例分析

典型个例选择原则为大尺度环流形势具有代表性，环境场中水汽、不稳定和抬升条件配合好，且出现的短时强降水站次多、小时雨强大。

3.3.1 副高边缘型 2018年8月2日甘肃省武威、兰州、白银市出现的区域性短时强降水为典型的副高边缘型。区域内75个观测站点日降水量≥30 mm，38个观测站点小时雨强≥10 mm·h^{-1}，最大小时雨强出现在兰州市永登县的徐家磨村达39.8 mm·h^{-1}，出现时间为10:00。这次短时强降水从2018年8月2日08:00中尺度发生条件分析可以看出（图4a），物理量均满足和超过副高边缘型设定阈值（表2）。造成这次短时强降水站次多、雨强大的主要原因是水汽来源充沛，一条来自南海的水汽、一条来自孟加拉湾的水汽，水汽通量散度辐合强，再加上干冷空气侵入加大了层结不稳定。

3.3.2 低压槽型 2017年8月19日甘肃北部张掖市以东出现的区域性短时强降水为典型的低压槽型。区域内10个观测站点日降水量≥30 mm、8个观测站点小时雨强≥10 mm·h^{-1}，最大小时雨强出现在

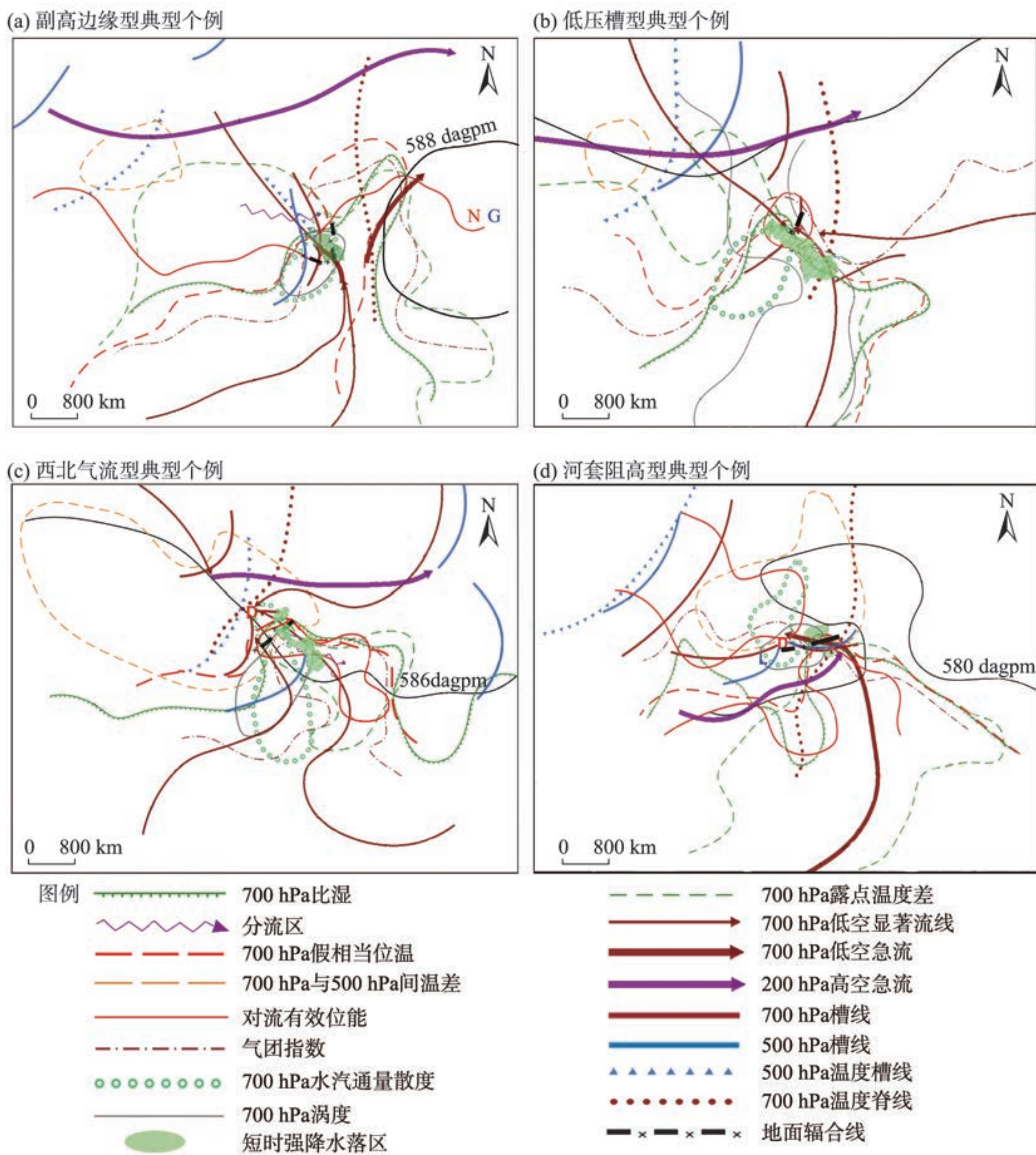


图4 甘肃北部短时强降水典型个例中尺度物理量要素配置

Fig. 4 Mesoscale physical element configuration of typical case of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

表2　甘肃北部短时强降水典型个例中尺度物理量值

Tab. 2　Mesoscale physical quantity thresholds values of typical case of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

	物理量阈值	副高边缘型（2018-08-02）	低压槽型（2017-08-19）	西北气流型（2018-08-20）	河套阻高型（2019-06-20）
抬升条件	500 hPa槽前	是	是	否	是
	中低层低涡切变	切变线	切变线	低涡人字型切变	低涡人字型切变
	地面辐合线	有	冷锋	有	有
	低空辐合	偏北风与偏南风辐合	偏南风、偏东风与偏北风辐合	偏南风与偏北风辐合	西南风与东南风辐合
	200 hPa急流	分流区	西风急流入口区右侧	分流区	西风急流出口区左侧
水汽条件	$t_{700}-td_{700}$/℃	≤4	≤4	≤4	≤4
	q_{700}/g·kg^{-1}	8	10	8	8
	qfdiv$_{700}$/g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}	-20	-20	-10	-1
	湿层/hPa	500~850	500~850	700~850	500~850
	低空偏南风急流（显著流线）	有	有	有	有
	θ_{se700}/℃	76	72	68	64
不稳定条件	温度垂直分布	上冷下暖	上冷下暖	上冷下暖	上冷下暖
	湿度垂直分布	深厚湿层	深厚湿层	上干下湿	深厚湿层
	$t_{700}-t_{500}$/℃	≥20	≥20	≥20	≥20
	CAPE/J·kg^{-1}	132	224	440	50
	K/℃	36	32	36	32
	VOR$_{700}$/10^{-5}·s^{-1}	20	5	5	40

白银市会宁县会师镇达39.8 mm·h^{-1}，出现时间为12:00。从2017年8月19日08:00中尺度发生条件分析中可以看出（图4b），物理量均满足或超过低压槽型设定阈值（表2）。造成这次短时强降水雨强大的主要原因是水汽来源充沛，一条来自孟加拉湾的水汽、一条为来自渤海的水汽；冷锋的动力抬升加大了层结不稳定。

3.3.3　西北气流型　2018年8月20日甘肃北部出现的区域性短时强降水为典型的西北气流型，区域内98个观测站点日降水量≥30 mm、81个观测站点小时雨强≥10 mm·h^{-1}，最大小时雨强出现在张掖市肃南县甘坝口达61.2 mm·h^{-1}，出现时间为15:00。从2018年8月20日20:00中尺度发生条件分析中可以看出（图4c），物理量均满足或超过西北气流型设定阈值（表2）。造成这次短时强降水站次多、雨强大的主要原因是水汽来源充沛，一条为来自南海的水汽、一条来自孟加拉湾水汽；垂直风切变强，上冷下暖层结加大热力不稳定。

3.3.4　河套阻高型　2019年6月20日甘肃酒泉、张掖市出现的区域性短时强降水为典型的河套阻高型，区域内30个观测站点日降水量≥30 mm、24个观测站点小时雨强≥10 mm·h^{-1}，最大小时雨强出现在张掖市山丹县双湖达25.3 mm·h^{-1}，出现时间为09:00。从2019年6月20日20:00中尺度发生条件分析中可以看出（图4d），物理量均满足或超过河套阻高型设定阈值（表2）。造成这次短时强降水站次多、雨强大的主要原因是水汽来源充沛，低空偏南风水汽输送达到急流标准；河套阻高底部的偏东风与偏南风形成强烈气旋性辐合，使VOR$_{700}$达到40×10^{-5}·s^{-1}，形成强辐合上升运动。

3.4　短时强降水的分布特征

2016—2019年5—9月主汛期短时强降水小时雨强（Q）≥10 mm·h^{-1}的站点数有1073个。其中，10≤Q<15 mm·h^{-1}占44.4%、15≤Q<20 mm·h^{-1}占23.3%、20≤Q<25 mm·h^{-1}占13.5%、Q≥25 mm·h^{-1}占18.8%。说明甘肃北部短时强降水小时雨强多在10~20 mm·h^{-1}（图5a）。一日中短时强降水主要出现时段为06:00—18:00，占73%，出现最多的时段09:00—12:00（图5b）。

甘肃北部短时强降水的时间分布特征：从图6可以看出，出现频次最多的为7月，共出现31次（占29.8%）；8月其次，共出现29次（占27.9%）；9月最少，仅6次（占5.8%）。各月主要出现的短时强降水类型：5月为低压槽型和西北气流型；6月为西北气流型和河套阻高型；7月为副高边缘型和河套阻高

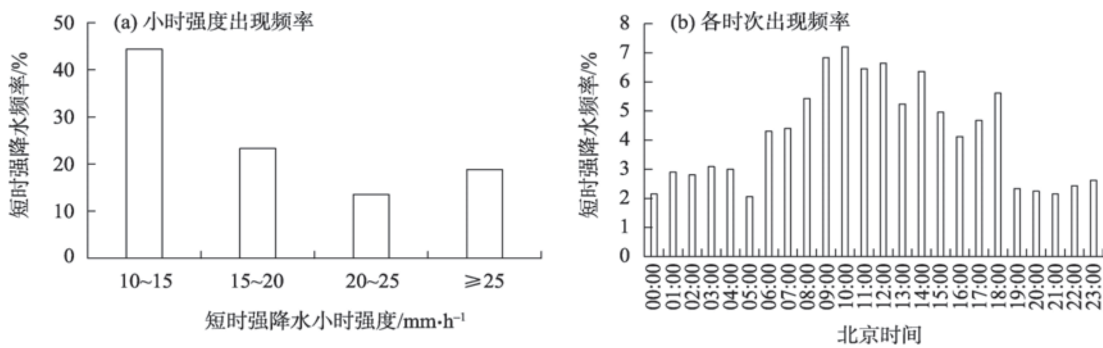


图5 2016—2019年5—9月甘肃北部短时强降水小时强度和逐时次出现频率

Fig. 5 Hourly rain intensity and hourly frequency of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province from May to September during 2016—2019

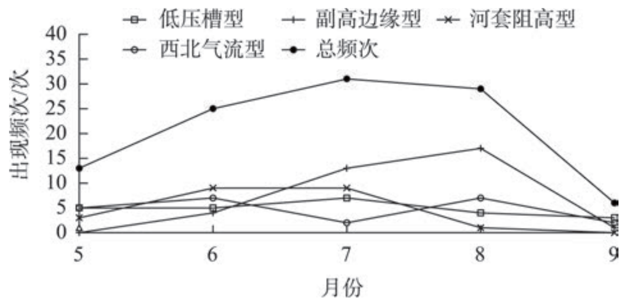


图6 2016—2019年5—9月不同流型短时强降水逐月累积出现频次

Fig. 6 Monthly accumulative frequency of short-time heavy rainfall of different flow pattern from May to September during 2016—2019

型；8月为副高边缘型和西北气流型；9月为低压槽型。

甘肃北部各类短时强降水空间分布特征(表3)：出现频次最多的为兰州市56次(占32.6%)，其次为白银市52次(占30.2%)，最少的为酒泉13次(占7.6%)，自东向西锐减。各地各类型分布特征：兰州市最多为副高边缘型、白银市最多为副高边缘型、武威市最多为低压槽型、张掖市最多为低压槽型和河套阻高型、酒泉市最多为河套阻高型。

3.5 预报指标检验

2020年5—9月共出现短时强降水个例22个。其中，副高边缘型11例、低压槽型7例、西北气流型4例。利用2020年5—9月ECMWF 24 h预报时段内逐3 h的预报场物理量资料对区域内短时强降水预报指标进行检验，根据不同天气分型选取的中尺度物理量要素配置阈值，滚动对研究区内所选物理量进行检索，当各项阈值均满足时，记为预报一次短时强降水过程；若24 h预报时段内连续多个预报时次预报有短时强降水，只记为一次短时强降水过程。2020年共预报短时强降水33次，其中预报正确21次、漏报1次、空报11次，预报准确率为63.6%、空报率33.3%、漏报率为3.0%。其中，空报11次有3次出现在副高边缘型、4次出现在低压槽型、4次出现在西北气流型。经分析发现空报的过程系统地面辐合线过境时间均出现在21:00—次日04:00，说明预报指标阈值都满足的情况下，夜间热力条件减弱将抑制短时强降水的发生；西北气流中的短时强降水空报率较高，说明地形抬升和局地热力抬升在短

表3 2016—2019年5—9月甘肃北部短时强降水主要环流出现频次(频率)

Tab. 3 Occurrence (frequency) of main circultion of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province from May to September during 2016—2019

城市	副高边缘型		低压槽型		西北气流型		河套阻高型	
	频次/次	频率/%	频次/次	频率/%	频次/次	频率/%	频次/次	频率/%
兰州市	24	42.1	12	25.5	9	34.6	11	26.2
白银市	19	33.3	15	31.9	10	38.5	8	19.0
武威市	8	14.0	10	21.3	3	11.5	9	21.4
张掖市	4	7.0	8	17.0	1	3.8	8	19.0
酒泉市	2	3.5	2	4.3	3	11.5	6	14.3

时强降水发生中的重要性。漏报1次为西北气流型，主要为水汽条件不满足，说明西北气流型中热力和动力抬升条件足够强，仍可产生短时强降水。

4 结 论

（1）副高边缘型短时强降水的关键系统为副热带高压长时间在110°E以西维持，配合有干冷空气入侵；或者是伊朗高压东移在青藏高原北边坡形成强辐合带。对应中尺度分析图上700 hPa在副高西北侧配合有切变线或低涡人字形切变，地面辐合线触发短时强降水爆发。此类短时强降水水汽供应充沛，降水范围大，落区相对集中，持续时间长，累积降水量大，是兰州、白银市产生极端降水的主要天气类型。

（2）低压槽型短时强降水的关键系统为西风槽与南支槽在青藏高原东北边坡同位相叠加。对应中尺度分析图上700 hPa有切变线或低涡人字形切变，低空偏南风急流（显著流线）与偏北风急流（显著流线）在甘肃北部辐合，地面冷锋触发短时强降水爆发。此类短时强降水存在较强的垂直风切变和上冷下暖的不稳定层结，降水范围大，持续时间短。

（3）西北气流型短时强降水的关键系统高空强烈干冷平流。对应中尺度分析图上高空槽后的温度槽和干舌明显，700 hPa有切变线、地面有辐合线配合，低空有南风急流（显著流线）与北风急流（显著流线）的辐合区。能湿条件为4种类型中最弱，仅低层存在湿层，由于500 hPa高空冷平流强，700 hPa河套暖脊的特征明显，存在上冷下暖、上干下湿的不稳定层结，高低空存在强烈的垂直风切变，有较强热力不稳定环境场触发短时强降水的发生。这类短时强降水出现在午后到傍晚，多为分散性出现，并与地形有关，降水极端性不明显。

（4）河套阻高型短时强降水的关键系统是在河套地区维持一顶部向西北方向伸展的高压脊，作用既阻挡了脊底部低涡的东移，使低涡长时间在甘肃北部盘踞，又阻挡了偏南暖湿气流向更高纬度输送，使甘肃北部形成强水汽辐合区。对应中尺度分析图上700 hPa有低涡人字形切变、地面有辐合线配合；短时强降水落区在低空南风急流（显著流线）、偏东风急流（显著流线）与偏西风急流（显著流线）的辐合区。这类短时强降水存在深厚的湿层，并有强烈的辐合上升运动，正涡度值为4种类型中最大，CAPE也处在梯度密集区，说明此类型短时强降水由强烈的上升运动和不稳定环境场触发。这类短时强降水持续时间长、小时雨强大，是河西走廊产生极端降水最主要的天气类型。

（5）甘肃北部短时强降水集中出现在6—8月，占总次数的81.7%。同时，甘肃北部短时强降水的强度多为10~20 mm，占67.7%。

（6）甘肃北部短时强降水大尺度流型为副高边缘型、低压槽型、西北气流型、河套阻高型四大类，发生最多的为副高边缘型，占34.0%。

（7）查阅大量参考文献发现，产生短时强降水的主要条件是中、小尺度天气系统的对流不稳定条件和强迫抬升[5-11]，地面辐合线（冷锋）是甘肃北部触发强对流天气的关键系统，地面辐合线（冷锋）的分析对短时临近预报至关重要。

（8）由于甘肃北部受青藏高原阻挡，水汽翻越高原后损耗很大，水汽条件成为制约该区域产生降水的主要条件。因此，甘肃北部除了具备对流不稳定和强迫抬升机制外，水汽条件成为能否产生短时强降水的关键因素。低空偏南风急流（显著流线）在110°E左右北上及在37°N左右产生辐合是判断甘肃北部能否产生短时强降水的重要依据。

需要说明的是本文选取2016—2019年104个个例对短时强降水天气类型进行分型和特征分析，个例数有些偏少，其结果的普适性有待于通过更多天气个例来进一步验证和完善。并且强对流天气的触发主要是中、小尺度天气系统，因此将雷达资料和中尺度模式资料融合进预报模型中将是下一步研究的重点。

参考文献（References）

[1] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法[J]. 气象, 2011, 37(8): 913−918. [Yu Xiaoding. Ingredients based forecasting methodology[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(8): 913−918.]

[2] 俞小鼎, 周晓刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311−337. [Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 311−337.]

[3] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014. [Sun Jisong, Dai Jianhua, He Lifu, et al. Basic principles and technical methods of severe convective weather forecast:

Handbook of severe convective weather forecast in China[M]. Beijing: Meteorological Press, 2014.]

[4] Doswell Ⅲ C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Weather and Forecasting, 1996, 11(4): 560−581.

[5] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 795−801. [Zheng Yuanyuan, Yao Chen, Hao Ying, et al. The short-time forecasting and early-warning reasearch on severe convective weather under different types of large-scale circulation background[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(7): 795−801.]

[6] 徐爱华, 孙继松, 徐东蓓, 等. 中国中东部强对流天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400−411. [Xu Aihua, Sun Jisong, Xu Dongbei, et al. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 400−411.]

[7] 白晓平, 王式功, 赵璐, 等. 西北地区东部短时强降水概念模型[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1248−1256. [Bai Xiaoping, Wang Shigong, Zhao Lu, et al. Conceptual models of short-time heavy rainfall in the east of northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(5): 1248−1256.]

[8] 张一萍, 吴蓁, 苏爱芳, 等. 基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1492−1502. [Zhang Yiping, Wu Zhen, Su Aifang, et al. Analysis on severe convective weather characteristic in Henan based on flow pattern identification and physical elements[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 1492−1502.]

[9] 周后福, 邱明燕, 张爱民, 等. 基于稳定度和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 716−722. [Zhou Houfu, Qiu Mingyan, Zhang Aimin, et al. Analysis on short-time forecast of severe convection weather based on stability and energy indexes[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(4): 716−722.]

[10] 刘国忠, 黄开刚, 罗建英, 等. 基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术研究[J]. 气象, 2013, 39(1): 20−27. [Liu Guozhong, Huang Kaigang, Luo Jianying, et al. Research on the short term forecasting technique of persistent rainstorm with conceptual model and ingredients based method[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(1): 20−27.]

[11] 何钰, 陈小华, 杨素雨, 等. 基于"配料法"的云南短时强降水预报概念模型建立[J]. 气象, 2018, 44(12): 1542−1554. [He Yu, Chen Xiaohua, Yang Suyu, et al. Forecast conceptual model establishment of short time severe rainfall on Yunnan based on the "ingredients"[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(12): 1542−1554.]

[12] 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等. 甘肃河东地区不同环流形势下短时强降水的雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1057−1070. [Kong Xiangwei, Yang Jiancai, Li Hong, et al. Analysis of radar echo characteristics of short-term heavy precipitation weather with different circulation pattern in east Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1057−1070.]

[13] 王俊, 王文青, 王洪, 等. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1071−1086. [Wang Jun, Wang Wenqing, Wang Hong, et al. Characteristics of the raindrop size distribution during a short-time heavy rainfall and a squall line accompanied by hail[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1071−1086.]

[14] 陶健红, 孔祥伟, 刘新伟. 河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 107−117. [Tao Jianhong, Kong Xiangwei, Liu Xinwei. Analysis on water vapor characteristics of two extreme rainstorm events in western Gansu corridor[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(1): 107−117.]

[15] 李建刚, 姜彩莲, 张云惠, 等. 中亚低涡背景下一次短时强降水过程MCS成因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 724−734. [Li Jiangang, Jiang Cailian, Zhang Yunhui, et al. Causal analysis of MCS in a short time severe precipitation process under the background of Central Asia vortex[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 724−734.]

[16] 王昀, 卢品睿, 王旭. 天山南侧喀什地区冰雹潜势预报及预警指标的研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 937−944. [Wang Yun, Lu Pinrui, Wang Xu. Nowcasting indicators of radar of hail cloud in southern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 937−944.]

[17] 钱莉, 杨永龙, 张宇林, 等. 河西走廊东部极端降水的时空分布及影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 207−214. [Qian Li, Yang Yonglong, Zhang Yulin, et al. Temporal and spatial distribution and influence factors of extreme precipitation in eastern Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 207−214.]

[18] 钱莉, 方锋, 杨永龙, 等. 河西走廊东部冰雹的气候特征及天气特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 50−55. [Qian Li, Fang Feng, Yang Yonglong, et al. Analysis on hail and weather characteristics in the east Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(1): 50−55.]

[19] 黄玉霞, 王宝鉴, 王勇, 等. 甘肃省强对流天气中尺度分析业务技术规范[M]. 北京: 气象出版社, 2017. [Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Yong, et al. Technical specification for mesoscale analysis of severe convective weather in Gansu Province[M]. Beijing: Meteorological Press, 2017.]

Mesoscale characteristics and physical quantity allocation of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province

QIAN Li[1,2,3],　ZHANG Chunyan[3],　YANG Mei[3],　LI Tianjiang[3]

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of Gansu Province (China Meteorological Administration), Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: From the precipitation data of 27 national automatic weather stations and 635 regional weather stations in northern Gansu Province of China, combined with the conventional air, ground, and ECMWF reanalysis data, 104 cases of typical short-time heavy rainfall from May to September during 2016—2019 were selected. In this paper, mesoscale comprehensive analysis of environmental conditions for the occurrence and development of short-time heavy rainfall in northern Gansu Province was performed, and some characteristics and laws of short-time heavy rainfall in this region were revealed. The results show the following: (1) The short-time heavy rainfall in northern Gansu Province primarily occurs from June to August, and the intensity of short-time heavy rainfall is mostly 10−20 mm. (2) The typical characteristics of short-time heavy rainfall weather in northern Gansu Province can be divided into four flow types: subtropical high marginal type, low-pressure trough type, northwest airflow type, and high flow resistance type. (3) The relation and difference between different weather conditions, flow types, and physical parameters are discussed. The circulation characteristics and physical factors indexes and thresholds of various short-time heavy rainfall weather are summarized. (4) The surface convergence line (cold front) is the key system triggering severe convective weather in northern Gansu Province, and the analysis of the surface convergence line (cold front) is critical for short-time near rainfall forecast. (5) Low-level southerly jet (significant streamline) convergence at 110°E and 37°N is an important basis for judging whether short-time heavy rainfall can occur in northern Gansu Province. The prediction accuracy of short-time heavy rainfall in 2020 is 63.6%, indicating that the established short-time heavy rainfall forecast index has a strong capability, providing a new way to improve the short-time heavy rainfall forecast and early warning ability.

Key words: short-time heavy rainfall; weather types; mesoscale analysis; physical quantity; factors allocation